

**EVALUACION DE LA SELECCIÓN ESPACIAL PARA LA UBICACIÓN ACTUAL DEL
RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA (RSDJ) APLICANDO METODOLOGIA MCDA-SIG**



CESAR DAVID MUÑOZ CASTELLANOS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Especialista en Geomática

Director:

JAVIER CONTRERAS

UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA

FACULTAD DE INGENIERA

Especialización en Geomática

BOGOTÁ, 27.12.2018

EVALUACION DE LA SELECCIÓN ESPACIAL PARA LA UBICACIÓN ACTUAL DEL RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA (RSDJ) APLICANDO METODOLOGIA MCDA-SIG

ASSESSMENT OF THE SPATIAL SELECTION FOR THE CURRENT LOCATION OF DOÑA JUANA LANDFILL EMPLOYING METHODOLOGY MCDA-SIG

Cesar David Muñoz Castellanos

Ingeniero Químico, Facultad de Ingeniería, Especialización en Geomática. Universidad Militar Nueva Granada. Bogotá, Colombia, u3101405@unimilitar.edu.co

RESUMEN

El crecimiento poblacional continuo de las grandes ciudades como Bogotá conlleva el incrementado de producción de residuos, cerca de 2295459 toneladas fueron recolectadas en el relleno sanitario Doña Juana en el 2017, sumado a estos volúmenes de residuos, la constante problemática que ha tenido el relleno desde su diseño ya que no se ubicó en los terrenos que se habían establecido, los derrames de basura que ya se han presentado, la oposición de la población aledaña, la multiplicidad constante de vectores, la contaminación del río Tunjuelo, plantea la necesidad de buscar metodologías que bajo un estudio técnico y considerando las diferentes variables del entorno identifique áreas para la localización de los rellenos sanitarios, con el desarrollo de este estudio a partir de la revisión en la literatura de las diferentes metodologías usadas para la selección de la ubicación de rellenos sanitarios se entra a evaluar la actual ubicación del relleno sanitario Doña Juana (RSDJ), mediante metodología MCDA-SIG, aprovechando la sinergia de estas dos herramientas, después de aplicar el procedimiento se encuentra que la ubicación del relleno sanitario evaluando; criterios ambientales como precipitación, amenaza por deslizamientos, distancia a cuerpos de agua, permeabilidad del suelo, la pendiente del terreno, criterios sociales como distancia a áreas pobladas y velocidad del viento y criterios económicos como accesibilidad vial, le dan a la actual ubicación del relleno una puntuación promedio para la mayor parte del área del relleno de 5/10, visualizando cada una de las variables analizadas se pudo observar que respecto a la normatividad local y a la experiencia internacional la actual ubicación del relleno no es la mas adecuada.

ABSTRACT

The continuous population growth of the big cities like as Bogotá carry to increment of waste production, around of 2295459 tons were collected in the Doña Juana landfill in 2017, additionally to these volumes of waste, the continuous problems that the landfill has had since its design, such as, farms different to the originals, the spills of the garbage, surrounding population opposition, the constant multiplicity of the pollution vectors, the contamination of the Tunjuelo river, require methodologies that evaluate the different criteria's; to identify the areas for the location of landfills. With the development of this study, the review of the literature, for the methodologies, used for the selection of the location of sanitary landfills the objective is to evaluate the current location of the Doña Juan sanitary landfill (RSDJ), through The MCDA-SIG method, taking advantage of the synergy of these two tools, after applying the procedure evaluating; environmental criteria such as precipitation,, landslides, distance to rivers/streams, land permeability, land slope, social criteria's like as populated areas and wind speed and economical criteria as road accessibility, the current location of the landfill have average score for the most area of the landfill of 5/10, additionally visualizing each of the variables separately and agree with local regulations and international experience, the current location for the Doña Juana Landfill it's not the most appropriate.

INTRODUCCION

El incremento acelerado de la población ha traído como consecuencia el aumento significativo de desechos y residuos, que deben tener el adecuado tratamiento, esta problemática ha tomado gran interés durante los últimos años e incluso es tema central de las grandes reuniones y acuerdos a nivel global. Son variados los métodos de tratamiento de residuos, y cada uno trae sus ventajas y desventajas, sin embargo, el uso de rellenos sanitarios es el más utilizado, este es un lugar técnicamente seleccionado y diseñado para

operar y disponer controladamente los residuos para finalmente ser cubiertos. La selección de este sitio se debe realizar cuidadosamente, ya que el impacto socio-ambiental generado es alto; es así que la integración de herramientas de información geográfica SIG y metodologías de evaluación multicriterio (MCDA) son uno de los métodos que se han venido utilizando en diferentes estudios para la adecuada selección de este tipo de sitios.

El crecimiento poblacional de Bogotá, con tasas cercanas al 2% anual, así como las tasas de crecimiento económico del orden del 4%, conllevan al incremento de la demanda de servicios públicos y oferta de ciudad, con lo cual ha incrementado de manera significativa la producción de residuos en la ciudad, actualmente con una tendencia de crecimiento constante del orden del 4% en promedio¹. Bajo el capítulo 3 del título 2 de la parte 3 del libro 2 del decreto 1077 de 2015 y modificado por el decreto 1784 del 2 de noviembre de 2017 expone en su artículo 2.3.2.3.9, una serie de parámetros a los que se le asignó un puntaje (sobre 100 puntos totales) con el fin de ubicar áreas para nuevos rellenos sanitarios municipales o regionales. El ente territorial definirá la incorporación al plan de ordenamiento (POT, PBOT, EOT), de los polígonos donde potencialmente se localizarán dichas áreas, de acuerdo con los siguientes criterios:

1. Identificación de determinantes ambientales debidamente incluidas en la cartografía oficial del POT, PBOT O EOT.
2. Establecimiento de la cercanía a aeropuertos en cumplimiento de las directrices de la Aeronáutica Civil referidas a obstáculos o impedimentos a la aviación.
3. Identificación de áreas con riesgo no mitigable Incorporados en POT, PBOT O EOT.
4. Identificación del perímetro urbano, zonas de expansión urbana y centros poblados.
5. Identificación de sitios intervenidos con la actividad de disposición final de residuos.

Aunque el tema de los rellenos sanitarios en el país es una noticia frecuente en la que se evidencian los problemas sociales y de contaminación, son poco atendidos y rápidamente se quedan en el olvido, de un estudio realizado por la Superintendencia de servicios públicos y el departamento nacional de planeación se evidencio que el país cuenta con 147 rellenos de los cuales 13 tienen la licencia de funcionamiento vencida, 20 tienen menos de un año de vida útil, 21 sitios entre 1 y 3 años de capacidad y a 41 les quedan entre 3 y 10 años de funcionamiento², para el caso de Bogotá específicamente, que es atendido principalmente por el botadero de doña Juana el panorama es crítico en el 2017 se debieron atender 2295459 toneladas de residuos, según cifras del observatorio ambiental, además es de conocimiento público las varias demandas interpuestas y los derrumbes de basura que se han ocasionado, la urgente necesidad de encontrar un nuevo sitio para la disposición de estos residuos, como el del proyecto denominado praderas de antelio que hasta hace unos meses la ANLA había negado su licenciamiento y que aún se encuentra en fases de estudio. Es evidente que el entendimiento de la problemática dentro de nuestra región del uso de rellenos sanitarios para el tratamiento de residuos es escaso y hasta hace poco tiempo se ha implementado su regulación. De todo lo anterior se plantea la necesidad de buscar metodologías que bajo un estudio técnico y considerando las diferentes variables del entorno identifique las áreas para la localización de los rellenos sanitarios, con el desarrollo de este estudio a partir de la revisión en la literatura de las diferentes metodologías usadas alrededor del planeta para la selección de la ubicación de rellenos sanitarios se entra a evaluar la actual ubicación del relleno sanitario Doña Juana (RSDJ), mediante metodología MCDA-SIG,

¹ Disponible en medio digital: Aportes para la Construcción de la Política Basura Cero Bogotá Humana. UAESP. Noviembre de 2012. Pág. 23

² Basuras una bomba de Tiempo en Colombia. El colombiano 5 de noviembre de 2017

ANTECEDENTES

El Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ) es en la actualidad el sitio autorizado para la disposición final de los residuos sólidos de la ciudad de Bogotá. Según (Tchobanoglous y Kreith) (2002) un relleno sanitario, en el pasado fue un término “usado para denotar un relleno en el cual los desechos eran cubiertos al final de cada día de operación, hoy día se refiere a una facilidad de ingeniería para la disposición de residuos sólidos diseñada y operada para minimizar impactos a la salud pública y al ambiente” (p. 14.2). Entendiendo de esta última forma el concepto de relleno sanitario, se evidencia que es una técnica recientemente implementada en el país y que hasta hace muy poco tiempo ha sido regulada.

Esta técnica ha sido la más usada mundialmente, por tener bajos costos de operación y ser ambientalmente la más aceptada; es un proceso que involucra, “la planeación, diseño, monitoreo ambiental, cerramiento y control post-cerramiento del relleno sanitario” (Tchobanoglous y Kreith, 2002, p. 14.1), utilizando principios de ingeniería para confinar la basura en un área lo más pequeña posible, reduciendo al máximo permisible su volumen, para luego ser cubiertas y compactadas, por una capa de tierra o del relleno disponible diariamente. El método constructivo y de operación; se fundamenta en el proceso de tapado del relleno, en el que influye la topografía del terreno, la disposición y material de cubierta, el nivel freático, entre otras variables asociadas al terreno.

Los principales métodos usados para los rellenos sanitarios según (Tchobanoglous y Kreith) (2002) pueden ser clasificados “como (1) Trinchera o Zanja, (2) área y (3) cañón (p. 14.5), figura 1. En el método de trinchera, los desechos sólidos son colocados en celdas o zanjas excavadas en el suelo (de hasta 7 m de profundidad) para posteriormente ser cubiertas con

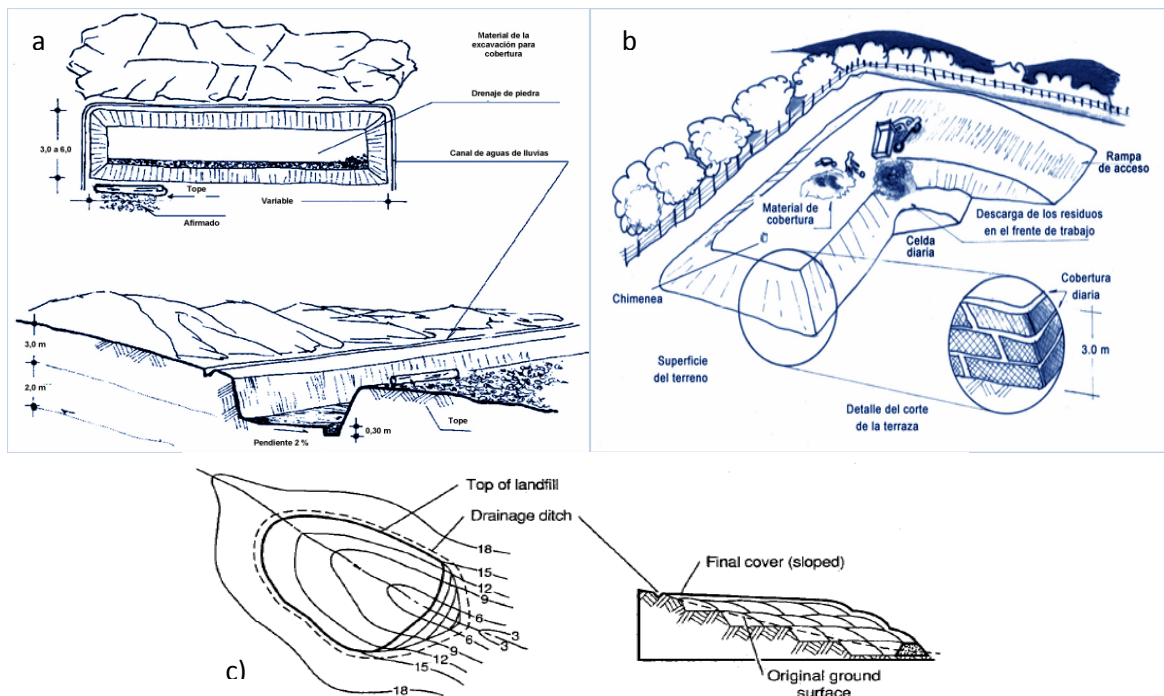


Figura 1. Métodos de Operación Rellenos sanitarios. a) Zanja o trinchera b) Área c) Cañón/depresión
Fuente: Tomado de Imágenes Google, (c) Handbook of solid Waste Management 2ª ed.

estos mismos, se usa en regiones planas, la zanja es forrada con material sintético de baja permeabilidad y deben ser construidos a niveles por debajo de aguas subterráneas, los terrenos con nivel freático alto o muy próximo a la superficie no son apropiados para este

tipo de relleno, tampoco deben construirse en terrenos rocosos por la dificultad de la excavación. El método de área se utiliza sobre el suelo el cual debe ser elevado unos cuantos metros, se usa en terrenos donde no es posible excavar, en áreas relativamente planas de hasta 30° de declive, y con pendientes suaves de compactación para evitar deslizamientos, el material de cubierta debe ser transportado desde otras áreas a través de volquetas y palas mecánicas, se debe instalar previamente un material de revestimiento y un sistema de lechada para los lixiviados donde se depositara la basura para posteriormente ser recubierta, materiales como compost, arena de fundición se usan como materiales intermedios de relleno, para finalmente ser recubiertos con materiales móviles como membranas geo-sintéticas, actualmente este es el método utilizado en el RSDJ. Mediante este método de operación se disminuyen los olores, peligros de incendio y roedores, pero si sus lixiviados y gases no son manejados adecuadamente podría convertirse en un simple vertedero o Botadero (Moreno, s.f., p. 4) como hasta hace poco era el caso de Doña Juana.

Se han utilizado cañones, barrancos, pozos secos y canteras para el método de cañón-depresión, las técnicas varían según la geometría del terreno, la hidrología y geología del sitio, el tipo de lixiviado y las instalaciones de control de gas, así como el acceso al sitio. El control del drenaje de superficie es el factor más crítico bajo este método, los residuos se descargan en la base del talud, se extiende y se apisona contra él, conservando una pendiente suave, para posteriormente ser cubierto con tierra proveniente de las laderas características del terreno.

Dentro del Sistema de manejo de residuos sólidos la disposición final se logra a través de Rellenos Sanitarios o por dispersión en el terreno (Land Spread) o en botaderos, es finalmente el último lugar donde terminan nuestros desechos ya sea que mediante otros métodos durante la recolección y procesamiento, se haya minimizado su volumen, tales como en incineradores, bioreactores, reciclaje entre otros, por esto la necesidad de realizar una adecuada selección tanto del sitio como del método de operación del relleno sanitario, las otras dos formas de disposición técnicamente y ambientalmente no son las más recomendadas.

El problema del tratamiento de residuos sólidos en Bogotá viene desde hace muchos años, en la década de los 80's, existían 2 botaderos; El Cortijo, ubicado al noroccidente, sobre la margen derecha de la autopista a Medellín, sobre la margen izquierda del Río Bogotá; y el otro botadero llamado Gibraltar, que se inició en 1979 como un Relleno Sanitario y se convirtió rápidamente en un botadero de basura, por falta de material de cobertura (Collazos, 1998, parr. 7), a raíz de la problemática con las basuras en esta década, en 1984, la CAR contrató con el consorcio Colombo-Americano INGESAM-URS, el diseño del relleno sanitario Doña Juana para la disposición final de las basuras de la ciudad de Bogotá y los municipios aledaños, Funza, Madrid, Mosquera y Soacha. Según el OBSERVATORIO DE SALUD AMBIENTAL (2015), el sitio seleccionado:

Estaba ubicado en la parte alta de la Vereda El Mochuelo al margen de la vía a Pasquilla. El Distrito Capital no pudo adquirir los predios seleccionados, viéndose obligado a adquirir los terrenos próximos a éstos y en los cuales se ha desarrollado el relleno sanitario Doña Juana. También en el año de 1984 la CAR contrata los estudios preliminares y posteriormente el diseño del relleno sanitario fue encargado a la Empresa Distrital de Servicios Públicos EDIS, en marzo de 1986 y esta a su vez inicia la operación de este (Zona Antigua), posteriormente con los diseños desarrollados por el Ingeniero Héctor Collazos y se da cierre a los botaderos El Cortijo y Gibraltar donde se venía disponiendo a cielo abierto los residuos sólidos de la ciudad

Finalmente, el 1 de Noviembre de 1988 se cerró el botadero de basura de Gibraltar y se inauguró el Relleno Sanitario Doña Juana, el sitio originalmente escogido fue seleccionado de entre 14 preseleccionados clasificados como aptos, teniendo en cuenta el orden de elegibilidad y las características urbanas de Bogotá, que inciden en el diseño de los programas de recolección y disposición de los residuos sólidos según Collazos, Hector, así mismo este autor describe que el área del relleno fue seleccionado por los siguientes aspectos:

- Su gran extensión y por ende una capacidad apreciable para recibir basura.
- Cercanía a la Autopista al Llano, lo que asegura una vía arteria con buenas especificaciones y capacidad de recibir alto tráfico automotor.
- Densidad poblacional prácticamente nula (Posterior a la iniciación del Relleno Sanitario, se construyeron viviendas más cercanas)
- Zona de muy baja actividad agrícola.
- Zona con gran espesor de arcilla, que hace presumir una buena impermeabilidad, con bajos costos.
- Volumen considerable de material de cobertura.
- Buena calidad de material de cobertura.
- Factibilidad de recibir residuos peligro

Del estudio del Impacto Ambiental, para el área seleccionada se mencionaba que la afectación en el área sería mínima, sin embargo con el pasar de los años se ha evidenciado todo lo contrario, inclusive se han presentado emergencias como las ocurridas con los deslizamientos presentados en septiembre de 1997 en la que aproximadamente un millón de toneladas llegaron al río Tunjuelito, o la del 2015 con el deslizamiento de 550000 m³ de residuos dispuestos en la zona de optimización, fenómenos que aún siguen presentes y por los que a la ANLA se le ha entregado el seguimiento y control de algunas de las Fases del relleno que venía manejando la CAR. Adicional a lo anterior cada vez más el área del relleno se acerca a los barrios circundantes. El relleno ha funcionado por zonas desde su operación y en esa misma forma se han otorgado diferentes licencias a medida que se habilitaban dichas zonas, en la siguiente tabla se resume el funcionamiento de estas zonas.

Tabla 1. Zonas de Operación Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ)

ZONA	PERIODO DE OPERACIÓN	Area Ocupada (Has)	Comentarios
I (antigua)	11/1988 - 09/1993	15	Clausurada con Prado Sembrado
I (caja 7)	09/1993 - 02/1995	10,5	Clausurada con Prado Sembrado
I (mansión)	02/1995 - 10/1995	10	sistema de extracción forzada de gases clausurada con prado sembrado
II	10/1995 - 09/1997	25,2	Primer deslizamiento, solamente estuvo en operación 2 años
III			anexo a la zona II. Inicialmente diseñada para residuos peligrosos
IV	09/1997 - 01/1999	19,2	Zona de emergencia para el deslizamiento 1997 clausurada revegetalizada
V			Se construyó planta lixiviados
VI		3,2	zona de emergencia con vida útil de 1 mes, cuenta además con 2,9 ha para la disposición de los lodos producidos por la planta de Lixiviados
VII	01/1999 - 09/2002	40	Clausurada –Empradizada. extracción forzada de biogás
VIII	03/2002 a la fecha	45	en proceso de Optimización
Residuos Hospitalarios	desde 1988	1,5	Cuenta con tres trincheras
Disposición Planta tratamiento Lixiviados	Desde 2002	3,6	Adyacente a la zona VI

Fuente: Basado en Resolución 1484 del 03 de agosto 2018 y datos del observatorio de salud ambiental 2015

Al no haber podido realizarse la ampliación del relleno por presión de la comunidad, nace el proyecto conocido como “optimización del RSDJ” que prevé la utilización de la franja comprendida entre las Zonas VII y VIII. Esta optimización se advierte reutilizando los domos correspondientes a las Zonas intervenidas, de tal manera que se logren ubicar los residuos y ocupar parte de las etapas 1 y 2 de la Zona VII. La utilización de las zonas VII y VIII, permitiría a la ciudad aumentar la vida útil del proyecto dentro de los predios actuales, sin la necesidad inmediata de adquirir nuevos predios. (Plan ambiental Local, Localidad 19 ciudad Bolívar 2017-2020) Actualmente, el relleno sanitario Doña Juana es operado por Centro de Gerenciamiento de Residuos -CGR- Doña Juana S.A E.S.P, con licencia ambiental vigente, y disposición final en la primera terraza en la zona de Optimización Fase 2, es de 7,6 años con una vida útil hacia el primer trimestre de 2022.

Marco normativo

El relleno sanitario Doña Juana, está enmarcado dentro de la siguiente normatividad:

- Decreto 2811 de 1974, Código Nacional De Los Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente
- Ley 09 de 1979 Aire, agua, tratamiento de Residuos Sólidos y peligrosos y las diferentes Resoluciones y decretos Intrínsecos al manejo de estos elementos
- Constitución Política 1991, Marco Normativo colombiano
- Ley 99 de 1993, Por la cual se crea el Ministerio de Medio Ambiente y se organiza el Sistema Nacional Ambiental –SINA.
- Ley 388 de 1997 de Ordenamiento Territorial
- RAS 2000, Por el cual se reglamenta el sistema de aseo urbano en Colombia
- Decreto 1713 de 2002 reglamentar el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de los residuos sólidos ordinarios
- Guía Ambiental Para Rellenos Sanitarios, Ministerio de Medio Ambiente, 2002
- Resolución 1045 de 2003; Por la cual se adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS
- **Decreto 838 de 2005, Por el cual se modifica el decreto 1713 de 2002 sobre disposición final de residuos sólidos, en particular para la construcción y operación de los sistemas de disposición final de residuos sólidos.**
- Ley 1021 de 2006 Ley Forestal

En particular para lo concerniente a disposición Final de los residuos Sólidos en la ciudad de Bogotá, en la siguiente tabla se resume la normatividad concerniente para los últimos tres años.

Tabla 2. Marco Normativo Rellenos Sanitario Bogotá 2015-2018

PROCESO	Tipo de norma	Número	DIA	MES	Año	Artículo	Descripción	Entidad origen
Recolección, barrido y limpieza	Decreto	1077	26	Mayo	2015	artículo 2,3,2,2,5,118	Única Norma reglamentaria para sector vivienda, ciudad y territorio	Ministerio de Comercio Industria y Turismo- Presidencia
Disposición Final	Decreto	1076	26	Mayo	2015	Artículo 2.2.2.3.8.4.	Cesión total o parcial de la Licencia Ambiental.	MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
Recolección, barrido y limpieza	Decreto	465	11	noviembre	2016	Completa	Por el cual se adopta el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS- del Distrito Capital, y se dictan otras disposiciones	

PROCESO	Tipo de norma	Número	DIA	MES	Año	Artículo	Descripción	Entidad origen
Recolección, barrido y limpieza	Decreto	596	11	Abril	2016	completo	"Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con el esquema de la actividad de aprovechamiento del servicio público de aseo y el régimen transitorio para la formalización de los recicladores de oficio, y se dictan otras disposiciones"	Ministerio de Comercio Industria y Turismo- Presidencia
Recolección, barrido y limpieza	Decreto	495	11	Noviembre	2016	Completo	Por el cual se adopta el Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos - PGIRS- del Distrito Capital, y se dictan otras disposiciones	Alcalde Mayor
Disposición Final	Decreto	495	11	Noviembre	2016	Completa	Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos	Alcalde Mayor
Disposición Final	Resolución	472	28	Febrero	2017	Artículo 20	Por la cual se reglamenta la gestión integral de los residuos generados en las actividades de Construcción y Demolición (RCD) y se dictan otras disposiciones.	MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE
Disposición Final	Decreto	1784	2	Noviembre	2017	Completa	Por el cual se modifica y adiciona el Decreto 1077 de 2015 en lo relativo con las actividades complementarias de tratamiento, y disposición final de residuos , sólidos en el servicio público de aseo	MINISTERIO DE VIVIENDA CIUDAD Y TERRITORIO
Disposición Final	Decreto	2157	20	Diciembre	2017	Completa	"por medio del cual se adoptan directrices generales para la elaboración del plan de gestión del riesgo de desastres de las entidades públicas y privadas en el marco del artículo 42 de la ley 1523 de 2012"	DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO DE LA PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA
Disposición Final	Resolución	1094	16	Julio	2018	Completa	POR LA CUAL SE IMPONE A PREVENCIÓN UNA MEDIDA PREVENTIVA DE SUSPENSIÓN DE ACTIVIDADES Y SE TOMAN OTRAS DETERMINACIONES	AUTORIDAD NACIONAL DE LICENCIAS AMBIENTALES - ANLA
Disposición Final	Resolución	1484	3	Agosto	2018	Completa	Por el cual, el Ministerio de Ambiente ordena a la ANLA realizar la evaluación, control y seguimiento al proyecto "Relleno Sanitario Doña Juana".	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Fuente: www.alcaldiabogota.gov.co, Compilación de Normatividad, Doctrina y Jurisprudencia

En la normatividad resaltada en amarillo se puede encontrar Criterios y metodologías para la localización de áreas para disposición final de residuos sólidos, que comenzó inicialmente con el Decreto 838 de 2005, y que Mediante decreto 1077 de 2015 y modificado por el decreto 1784 del 2 de noviembre de 2017, con el fin de ubicar áreas para nuevos rellenos sanitarios municipales o regionales, el ente territorial definirá la incorporación al plan de ordenamiento (POT, PBOT, EOT), de los polígonos donde potencialmente se localizarán dichas áreas, de acuerdo con los siguientes criterios:

- Identificación de determinantes ambientales debidamente incluidas en la cartografía oficial del POT, PBOT O EOT.
- Establecimiento de la cercanía a aeropuertos en cumplimiento de las directrices de la Aeronáutica Civil referidas a obstáculos o impedimentos a la aviación.
- Identificación de áreas con riesgo no mitigable Incorporados en POT, PBOT O EOT.
- Identificación del perímetro urbano, zonas de expansión urbana y centros poblados.
- Identificación de sitios intervenidos con la actividad de disposición final de residuos

En la metodología se revisara los criterios asociados a la normatividad vigente.

El RSDJ en la actualidad cuenta con la licencia 2133 de diciembre 29 de 2000 por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) y sus modificaciones tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3. Licencia ambiental y modificaciones RSDJ

Legislación	Fecha Publicación	Objeto	Área licenciada
Resolución 2133	29/12/2000	Por la cual se otorga una Licencia Ambiental Única para la Zona VIII del Relleno Sanitario Doña Juana	Zona VIII
Resolución 2791 (Modificación)	29/12/2008	Por la cual se modifica una Licencia Ambiental y se toman otras determinaciones	Terraza 8 Zona VIII
Resolución 628 (Modificación)	10/04/2008	Por la cual se autoriza la disposición de residuos sólidos en el Relleno Sanitario Doña Juana y se adoptan otras determinaciones	Zona II – Área 3 en un volumen de 393,216 m y un área de intervención de 3.3 hectáreas
Resolución 2211 (Modificación)	22/10/2008	Por la cual se modifica una Licencia Ambiental otorgada mediante Resolución No. 2133 del 29 de diciembre de 2000	Optimización Fase 1, de las Zonas VII y VIII, para la disposición de residuos de origen doméstico para una capacidad de 9.3 millones de toneladas conformada por siete (7) terrazas que en conjunto ocuparía una zona de 5.4 hectáreas
Resolución 2791 (Modificación)	29/12/2008	modificó la Licencia Ambiental otorgada para el desarrollo del proyecto “Relleno Sanitario Doña Juana Zona VIII	incluir la construcción y operación de la terraza 8 localizada al costado sur de la Zona VIII
Resolución 1351 (Modificación)	18/07/2014	modificó la Resolución No. 2133 del 29 de diciembre de 2000 (Licencia Ambiental). ratificada mediante Resolución 2320 de 2014.	incluir la ejecución, construcción y operación del proyecto “Optimización Fase II de las Zonas VII y VIII del Relleno Sanitario Doña Juana

Mediante la resolución 1094 de julio de 2018 atendiendo al Oficio No. 22553 del 22 de febrero de 2018 de la Procuraduría General de la Nación, se impone medida preventiva en la suspensión inmediata de las actividades de aprovechamiento forestal y adecuación del área conocida como “Biosólidos”, localizada al norte del proyecto “Relleno Sanitario Doña Juana VIII”, y el impedimento manifestado por el Director de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca-CAR, para el trámite administrativo de licencia ambiental, otorgando así a la ANLA el manejo y supervisión de esta Licencia hasta que se cumplan las condiciones de esta resolución cuya competencia se limita al seguimiento ambiental en las Fases I y II de Optimización Zonas VII y VIII del relleno sanitario Doña Juana, donde se está solicitando Licencia ambiental.

Ubicación Geográfica

El Relleno Sanitario Doña Juana se localiza entre los 2.715 y 2.900 m.s.n.m., en la localidad 19 de Ciudad Bolívar al norte de Bogotá y al suroccidente del área urbana de la ciudad, en un área aproximada de 580 Ha (590,16 Ha para el polígono trazado en Arcmap), en la cuenca del río Tunjuelo a la margen izquierda del río, Kilometro 5 vía al llano, limitando con la localidad de Usme en su costado oriental, y entre las veredas mochuelo bajo y alto, ubicado en las coordenadas geográficas mostradas en la Figura 2. Según el plan ambiental LOCALIDAD 19 CIUDAD BOLÍVAR (2017 – 2020):

En la zona de funcionamiento del RSDJ, el Decreto 190 de 2004, establece como régimen de uso del suelo rural áreas para la producción sostenible y parque minero industrial del mochuelo, pues de las 303,78 ha usadas para el área de funcionamiento corresponden a: suelos de alta capacidad 150,35 ha, áreas de alta fragilidad 88,70 ha, áreas de manejo especial 42,60 ha y parque minero industrial 22,13 Ha.(2016). Sin embargo en la actualidad y según información geográfica encontrada en la geodatabase del Mapa de Referencia del

IDECA, tal y como se muestra en la Figura 2 la mayor parte del área corresponde a Zona Urbana. El relleno también cuenta con un área de expansión y reserva para la disposición de residuos de 269,50 ha.

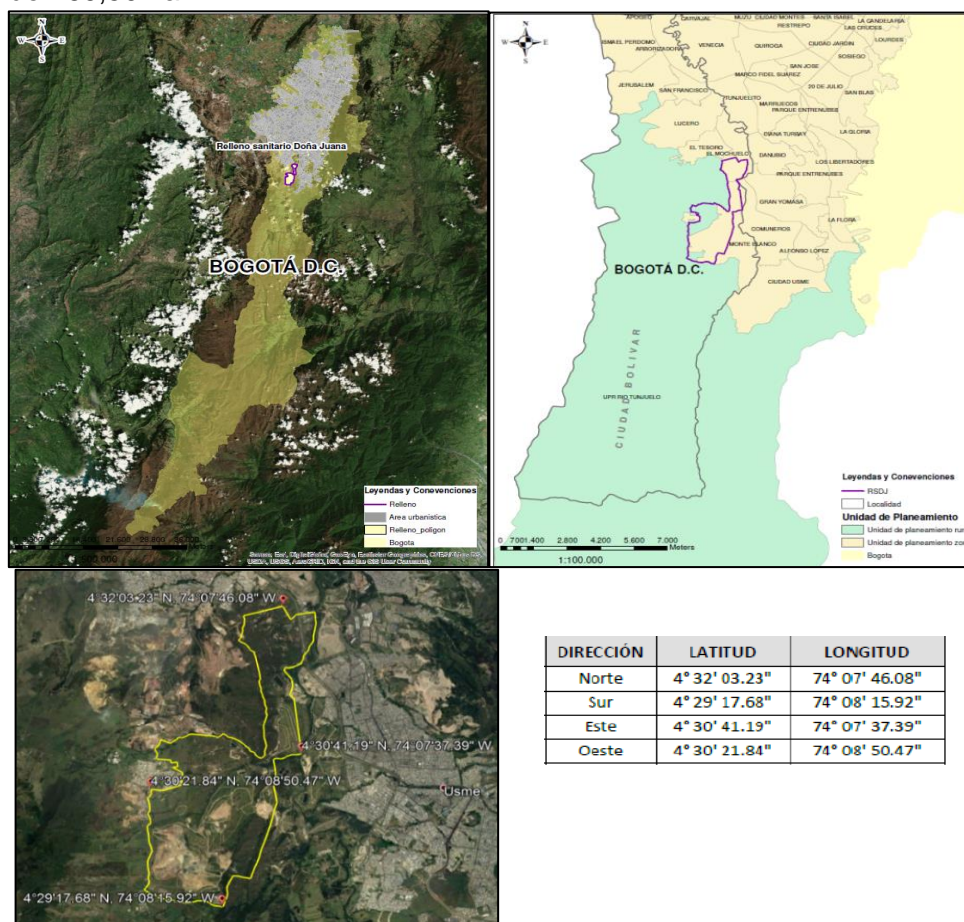


Figura 2. Ubicación Geográfica Relleno Sanitario Doña Juana
Fuente: Esta Investigación

Metodología

La adecuada selección de un nuevo sitio para la disposición Final depende de muchas variables, durante los últimos años se han venido realizando diferentes estudios de este tipo en las que se involucran herramientas SIG, por su potencial para agrupar y visualizar diferentes variables del entorno, en varias ciudades y regiones del mundo, no solamente para la selección del área del relleno sino también para su monitoreo y operación, como lo es con la tecnología Drone. Aunque la mayoría de estos estudios están enfocados a la selección de nuevos sitios, con el desarrollo de este artículo se quiere implementar una metodología MCDA (Multi-Criteria Decision Analysis) fundamentado en los diferentes estudios encontrados en las que se aplica este tipo de metodologías tanto a nivel local como internacional y la normatividad local vigente y evaluar la actual condición del relleno sanitario Doña Juana espacialmente hablando, apoyado en el auge de los sistemas de información geográfica en las diferentes entidades de nuestro territorio tanto a nivel nacional como distrital y el acceso más libre a esta información, y de esta forma realizar una mejor caracterización de las zona de estudio.

Son múltiples las áreas del conocimiento y por ende los criterios que se han tenido en cuenta a la hora de la selección del sitio para un relleno sanitario, criterios no solo de tipo ambiental

en las que se evalúa las condiciones del suelo y sus alrededores, sino también de tipo económico y social enmarcados dentro de una normatividad local. Con el desarrollo de las tecnologías de la información, actualmente el volumen de datos a tratar es mucho mayor que el registrado hace algunos años, aumentando la complejidad en la toma de decisiones como lo es la ubicación de un nuevo sitio para la disposición de residuos por su alto impacto socio-ambiental, por lo que es necesario implementar un procedimiento sistemático para la adecuada selección del sitio, usando técnicas MCDA se puede dar solución a problemas que involucren un gran conjunto de alternativas posibles y múltiples criterios de evaluación, la mayoría de veces estos criterios son de carácter conflictivo y pueden ser tomados por parte de un tomador de decisiones, o un grupo interesado en la problemática, para este caso, por la misma condición de las varias áreas de conocimiento implicadas, es mejor que los criterios de decisión sean tomados por un grupo interdisciplinario, así mismo dado la naturaleza espacial intrínseca en la ubicación de un sitio, el problema de la ubicación del relleno sanitario se resuelve con mayor eficiencia usando herramientas de Análisis Espacial como las usadas en los sistemas de información geográfica SIG, además que el carácter visual y multivariable (por la combinación y gestión de diferentes capas de información) del entorno que ofrece esta herramienta potencializa la toma de decisiones, es por esto que esta técnica MCDA-SIG son ampliamente usadas para resolver este tipo de problemas. (Malczewski, 2006); define este como una técnica que permite estructurar, diseñar, evaluar y priorizar alternativas en problemas de decisión mediante la combinación de datos geográficos y la evaluación de un conjunto de criterios cualitativos o cuantitativos para obtener información para la toma de decisión.

Un proceso sistemático como el MCDA-SIG consiste de un número de etapas coherentemente organizadas, dada la misma naturaleza del análisis multicriterio, en el que pueden existir múltiples criterios de evaluación MCE, por sus siglas en inglés, o múltiples Objetivos a Determinar (MODA), para el caso, el objetivo es único y es hallar la mejor ubicación para el relleno sanitario, así la estructura para una metodología MCE-SIG consisten de:

1. Establecer el Objetivo.(mediante arboles de decisión)
2. Determinar Los criterios (mapas de variables restrictivas y normativas y mapas de Factores de decisión- Políticos, Técnicos, ambientales, económicos).
3. Estandarización de Factores (asignación de puntajes a las diferentes variables)
4. Determinar los pesos de cada factor, ponderación relativa (generar mapas de disponibilidad indexando y clasificando estos)
5. Consolidación de los Criterios (adición de los diferentes mapas estandarizados mediante la comparación de las diferentes variables)
6. Validación de los resultados (Definir la robustez del modelo, realizar análisis de sensibilidad, hacer visitas de campo sobre los sitios seleccionados)

Estas seis etapas se encuentran enmarcadas bajo los tres conceptos fundamentales del análisis MCDA, estandarización de los valores, ponderación de criterios y reglas de combinación (decisión) (J. Malczewski y C. Rinner, 2015). Las alternativas de decisión son evaluadas bajo un conjunto de criterios, los cuales incluyen atributos y objetivos, como por ejemplo la medición de la velocidad del viento, el atributo es la velocidad y el objetivo determinar cómo este afecta la selección del sitio debido a la transmisión de olores. Como se ha mencionado son múltiples los criterios que se han venido usando en los diferentes estudios realizados a nivel mundial para la selección de la ubicación del relleno sanitario, en la tabla 4, se muestra algunos de los criterios comúnmente seleccionados para el estudio.

En (Abujayyab, Ahamad, Yahya, Bashir, & Aziz, 2016) se hace una revisión de los diferentes criterios y métodos utilizados en la selección de la ubicación de rellenos sanitarios, mediante

Tabla 4. Valoración de Criterios para la selección de la ubicación de un relleno sanitario

Criterio	Zafra,Tame Colombia, 2012		Dto 1077 de 2015	Rahmat Behbahan, Iran 2016		Cobos, Azuay Ecuador 2017		Asha, Thiruvananthapuram India 2016 *		Mohammad Al-Hashim. Iraq 2014		Becerra C/marca, Colombia, 2014		Mokhtar, Klang town Malaysia 2008	PRAHOVA COUNTY, ROMANIA 2013	Mohamed , Thermi Grecia 2013	Allen, EU 2003	
Distancia a cuerpos de agua	> 2000 m	50	60	>2500 m	10	> a 2000 m	10	1536.8-2665.7 m	10	>250 m	1	> 300 m	> 100 m	> 500 m	> 5000 m	30-2000 m		
	1000-2000 m	30	40	2000-2500 m	8	1000-1999 m	10	950.7-1536.8 m	8									
	500-999 m	15	20	1500-2000 m	6	500-999 m	5	526.2-950.7 m	6									
	50-499 m	7	10	1000-1500 m	4	50-499 m	5	228.5-526.2 m	4	0-250 m	0							
	< 50 m	0	0	300-1000 m	2	0-49 m	1	0-228.5 m	2									
< 300 m	0																	
Accesibilidad Vial Distancia de la vía de acceso	0-5 km	20	20	> 3 km	10	0-49m	1	435-761 m	10	0-500 m	0	Variable Comparativa	No especificado	NA	> 1000 m	30-600 m		
	5.1-10 km	12	12	1.5-3 km	6	50-499m	5	160-435 m	8	500-1000 m	3							
	10.1-15 km	4	4	1-1.5 km	4	500-999m	5	761-1291 m	6	1000-2000 m	2							
	> 15 km	0	0	300-1000	2	1000-1999m	10	1291-2365 m	4	>2000 m	1							
						> a 2000m	10	0-160 m	2									
Pendiente	0.1-3%	40	40	< 10%	10	0-3%	10	No especificado	0	≤ 15%	>2-5%	5	No especificado	> 25	1	< 5%	3	<20 °
	3.1-7%	30	30	10-20%	8	3.1-7%	10				>5-12%	3		15-25	2	5-15%	2	
	7.1-12%	20	20	20-25%	4	7-12%	5		1	≤ 15%	>12-30%	2		7-15	3	15-20%	1	
	12.1-25%	10	10	25-45%	2	12-25%	1				<=2 y >30%	1		3-7	4	20-32%	0	
	> 25%	0	0	> 45%	0	> a 25%	1				< 3	5						
Distancia perímetro Urbano	2-5 km	100	140	> 15 km	10	2000-4999 m	10	Variable Comparativa > 100 m y < 10 Km	0-5000 m	0	> 1000 m	> 500 m	>1000 m	>1000 m	400-6000 m			
	5.1-10 km	50	100	10-15 km	8	5000-9999 m	10		5000-10000 m	10								
	10.1-25 km	20	60	5-10 km	5	10000-24999 m	5		10000-15000 m	5								
	25.1-50 km	10	20	2-5 km	2	25000-49999 m	1		>15000 m	1								
	> 50 km	0	0	< 2 km	0	> a 50000 m	1											
Precipitación	NA			NA		0-999 mm	10	NA	NA			<=500mm	5	NA	528-609 mm	5	NA	Variable comparativa
						1000-2499 mm	5					500-1000mm	4		609-689 mm	4		
						2500-4000 mm	1					1000-1500mm	3		689-777 mm	3		
												1500-2000mm	2		777-870 mm	2		
												>2000mm	1		870-1053 mm	1		
Velocidad del viento	NA			No especificado		NA		NA	NA			<=1m/s	5	NA	NA	NA	Variable comparativa	
												1.0-1.5 m/s	4					
												1.5-2.0 m/s	3					
												2-2.5 m/s	2					
												>2.5 m/s	1					

una amplia investigación en la literatura científica publicada acerca del tema y haciendo una evaluación crítica acerca de los puntajes y criterios utilizados. La amplia investigación de la literatura reveló que 80 criterios se han ejecutado hasta ese momento. La cantidad de criterios se maximiza como resultado de la presión de una mayor conciencia ambiental de los investigadores, la oposición pública, los tomadores de decisiones y las regulaciones gubernamentales. En este estudio los criterios los agruparon en tres grandes grupos, criterios ambientales, sociales y económicos, formando así el primer árbol de decisión, el estudio mostró que 56% de los criterios obedecían a carácter ambiental, 26% económico y 18% de los criterios de carácter social. Los criterios sociales impactan sobre la aceptabilidad de este tipo de sitios en la población, fenómenos contra la ubicación y utilización de este tipo de sitios como NIMBY o LULUs, son ampliamente estudiados, en esta categoría se encontraron 19 subcriterios entre los que mayormente se encuentra en la literatura, cercanía a áreas urbanas y centros poblados, cercanía aeropuertos, sitios turísticos, arqueológicos y la dirección del viento. Los criterios de tipo económico ayudan a minimizar los costos, por ejemplo garantizando vías para el rápido acceso al relleno de los camiones de basura, bajo esta categoría en (Abujayyab, et al.2016) se encontraron 22 subcriterios entre los que destacan; el uso y cobertura de la tierra y la accesibilidad al sitio, en menor escala, está el costo de la tierra, pero este debería ser un factor muy importante a la hora de la selección de nuevos sitios. Finalmente para los criterios ambientales se tiene un mayor número de criterios estudiados (39 subcriterios). Teniendo en cuenta que el propósito de este documento es evaluar un sitio existente, es sobre este último tipo de criterios sobre los que se soportara este tipo de estudios, adicionalmente abarcan una gran cantidad de características que seguramente fueron objeto del estudio de impacto ambiental (EIA) original para el RSDJ, no obstante estos criterios influyen en el carácter social y económico de la selección del sitio. En la tabla 5 se resume los criterios encontrados por (Abujayyab, et al.2016), en su estudio. Entre los criterios mayormente encontrados en el estudio bajo el criterio ambiental están Ríos, corrientes de agua, pendientes, elevación, tipo de suelo y formación geológica/litológica, bajo este último criterio se puede caracterizar el tipo de suelo y clima asociado.

Tabla 5. Criterios Ambientales

Criterio	Sub-criterio	Criterio	Sub-criterio
Meteorología / atmosfera	Evaporación	Morfología	Elevación
	Régimen Climático		Aspectos de la tierra
	Humedad		Pendiente
	Precipitación	Suelo	Profundidad del suelo
	Temperatura		Tipo de Suelo
	Polución del aire		Permeabilidad del suelo
Geológicos	Deslizamientos		Minería y recursos de tierra
	Formación Geológica/Litológica		Contaminación de la tierra
	Zonas de Temblores	Geomorfología	Geomorfología(karst, erosión)
	Fallas		Periodo glacial y de nieve
Agua Subterránea	Acuíferos		Perforaciones
	Calidad del agua subterránea		Campos Geotérmicos
	Flujo de agua subterránea	Zonas sensibles	Cañones y Cuevas
	Conductividad Hidráulica		Plantas de almacenamiento Petroquímico
	Profundidad del Agua subterránea		Bosques Protegidos
Agua Superficial	Lagos /embalses		Áreas protegidas
	Ríos/corrientes		Cobertura natural y de cultivo
	Manantiales		Ecosistemas sensibles
	Terrenos inundables		
	Pantanos		
	Represas		

Fuente: Modificado de Abujayyab, et al.2016

Resultados

Para la determinación de la ubicación del relleno sanitario bajo la metodología MCDA-SIG, se aplica el proceso sistemático que se describe a continuación y que se resume en el siguiente diagrama de flujo

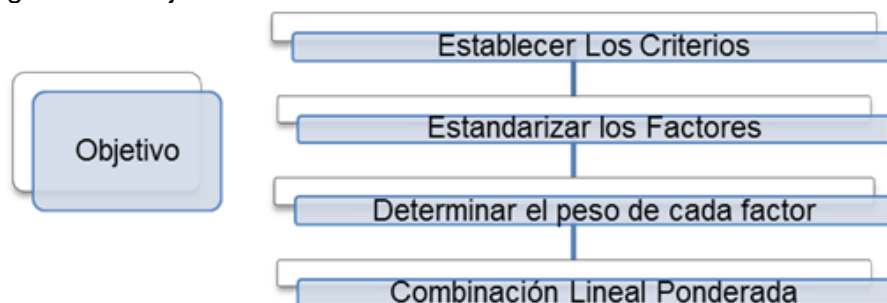


Figura 3. Procedimiento Evaluación Multicriterio

1. Establecer el Objetivo

Para este caso es un solo objetivo y es evaluar la actual ubicación del relleno sanitario Doña Juana (RSDJ), mediante metodología MCDA-SIG, esto corresponde a una evaluación multicriterio MCE.

2. Establecer los criterios.

Bajo la metodología utilizada se divide el grupo de criterios en dos clases; restrictivos y factores, los restrictivos son todas aquellas variables que por su carácter limitan o restringen la localización de este tipo de sitios; son áreas que se excluyen del estudio y que obedecen esencialmente a la normativa Colombiana, las variables de tipo factor son las variables de tipo técnico-ambiental, económico y social, como los que se revisaron anteriormente y que se ejemplifican en la tabla 4. De esta forma y teniendo en cuenta la disponibilidad de datos y capas de información geográfica en las diferentes fuentes tanto distritales como Nacionales, bajo las variables restrictivas se identificaron aquellas áreas protegidas y que se encuentran en el Registro Único Nacional de Áreas Protegidas RUNAP. De otra parte para los criterios de tipo factor y que entran a evaluar directamente en este caso la ubicación del relleno sanitario, para los criterios de tipo ambiental se tuvo en cuenta; la distancia a cuerpos de agua, la precipitación de la zona, la Geomorfología (pendientes, amenazas por deslizamientos) y litología del suelo, y la amenaza por inundación, sin embargo esta última es tratada como variable restrictiva debido a que la información encontrada solo abarca una pequeña porción del área de estudio. Para los criterios de tipo económico se analiza la capa de vías propias de la zona de estudio y finalmente bajo el criterio social se usaron las capas de áreas y centros poblados así como la velocidad del viento.

Ya que el objetivo del estudio es evaluar el área actual del relleno sanitario Doña Juana, la información encontrada se enfocó sobre esta ubicación, sin embargo y como se puede observar en la tabla 4 para los criterios de cercanía a vías y centros poblados un buffer de 15 y 50 Km, son las mayores distancias encontradas y obtienen las menores puntuaciones respectivamente, por lo que se decide utilizar como parámetro de referencia una distancia de 15 Km, no tan lejana de la zona de estudio, para establecer un área de interés (AOI) a partir del polígono del relleno para ir visualizando y caracterizando y obtener un mayor panorama de la zona de estudio (RSDJ).

Variables Restrictivas

RUNAP: Es el registro único de Áreas protegidas de Colombia en el que se condensa las áreas protegidas de cada una de las autoridades ambientales según jurisdicción, de RUNAP, 2018 se obtuvo la capa de información como la que se muestra en la figura 4. En la zona de estudio del relleno no existen zonas de áreas protegidas, sin embargo en el área de interés AOI se observan Bosques y parques que pertenecen a reservas naturales y forestales, sobre lado oriental del relleno se observa una gran reserva forestal perteneciente a los Bosques Orientales de Bogotá

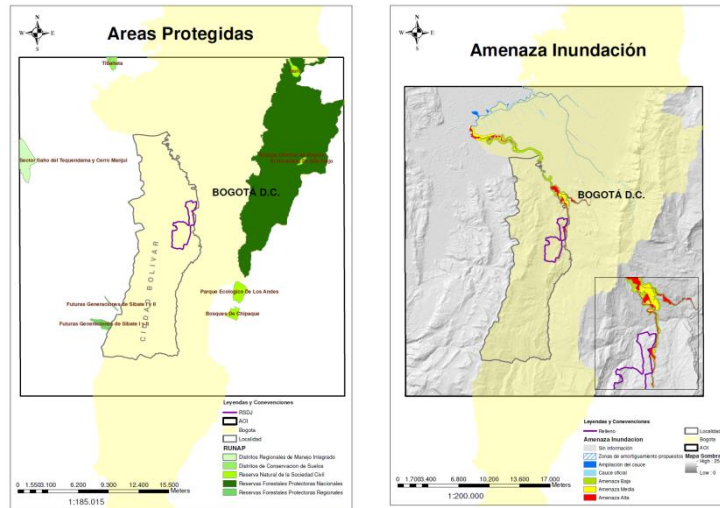


Figura 4. Variables Restrictivas ubicación RSDJ

Amenaza por Inundación: Representa la categorización por ocupación del agua por desbordamiento del cauce natural en las zonas cercanas a ríos y quebradas, principalmente en zonas aledañas al río Tunjuelo que bordea la localidad de ciudad bolívar y que se encuentra sobre los límites del Relleno, como se puede observar en el área aumentada de la figura 4 la amenaza por inundación del río Tunjuelo es de alta a media sobre la zona Nororiental del relleno. En el Geoportal del IDIGER se encuentra esta capa para el área urbana de Bogotá, adoptado mediante la Resolución 1060 del 19 de Julio de 2018, para el resto de la zona de interés no se encontró información adicional.

Criterios ambientales

- **Precipitación:** La presencia de Lixiviados propios de la operación de este tipo de sitios puede llevar a la contaminación de fuentes de agua subterráneas. Un nivel alto de precipitación en la zona implica un mayor impacto, sin embargo esto puede ser mitigado desde el diseño del relleno mediante diques y sistemas de drenaje. La precipitación se define como el volumen de agua lluvia que pasa a través de una superficie en un tiempo determinado, se mide en milímetros y equivale a un (1) litro de agua por metro cuadrado de superficie o a diez (10) metros cúbicos de agua por hectárea. Del visor geográfico de la secretaria distrital de ambiente, se obtiene la capa para diferentes años en diferentes épocas, sin embargo este solo abarca el área urbana de Bogotá, por lo que fue necesario obtener la data puntual; en el sistema de datos abiertos se encontró el conjunto de datos de la red de estaciones hidrológicas de la CAR para Cundinamarca, se tomó como referencia los datos encontrados en el 2017 de la precipitación total mensual, acumulado anual para cada una de las estaciones, una vez revisada la información mediante interpolación IDW se obtuvo el mapa de predicción de precipitación para el área de interés, no se llevó a cabo un

análisis estadístico de los datos pero respecto a la información encontrada en la secretaria de ambiente, de una capa encontrada en la CAR, “RICV Amenaza Precipitación Condiciones Normales 2014” y del mapa de precipitación Media total anual del atlas Interactivo Climatológico del IDEAM, se pudo determinar que la predicción bajo el método Geoestadístico IDW con un factor de suavizado de 0,5 y un parámetro de potencia de 2 se obtienen resultados acertados similares a los encontrados en estas capas. En la figura 5 se puede apreciar los resultados obtenidos.

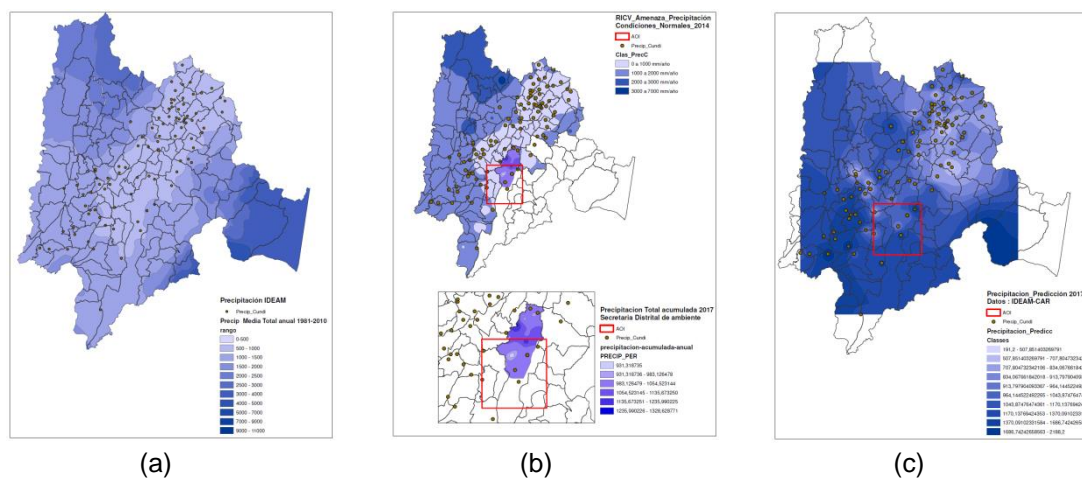


Figura 5: Predicción de la precipitación. a) Mapa de precipitación IDEAM b) (arriba) Mapa de precipitación CAR (abajo) Mapa de precipitación Zona Urbana Secretaria distrital ambiente, c) Mapa de predicción de la precipitación

De la anterior figura se puede observar como para el mapa del IDEAM se obtienen precipitaciones de 500 a 1500 con una mayor proporción de 500 a 1000 mm sobre el área de interés, para el caso de la amenaza de precipitación 2014 se observan valores de 0 a 1000 mm en una mínima porción del área de interés y mediante el mapa zona Urbana de la precipitación de la secretaria se observa valores desde los 931 a los 1328 mm, finalmente para el mapa de predicción se observan valores entre los 913 a los 1370 mm.

- **Distancia a cuerpos de agua:** La Ubicación del Relleno sanitario debe estar lo más lejos posible de fuentes de agua, por la posibilidad de contaminación del mismo. Como se observa de la tabla 4 la mínima distancia a la que se puede encontrar un cuerpo de agua es de 50 m, tal y como se encuentra en el decreto 1077 de 2015 en su artículo 2.3.2.3.2.2.4, sin embargo este es un parámetro muy restrictivo y limita gran parte de la zona de estudio, por lo que una distancia mínima de 300 m es adecuada para el caso. De la Geotadabase del mapa de referencia de IDECA se obtiene la información oficial empleada por el distrito bajo el feature class Superficie de Agua. En la figura 7 se puede observar los cuerpos de agua presentes en la zona de interés, nuevamente se puede observar la cercanía del río Tunjuelo al área del relleno.
- **Pendientes:** Un mayor grado de inclinación puede incurrir en mayores costos por actividades de excavación, por accesibilidad al sitio del relleno, además de la posibilidad de contaminar zonas con menor pendiente. Los sitios con pendientes pronunciadas generalmente no son técnicamente adecuados para la construcción de Rellenos, una pendiente de plana a ligeramente inclinada son las más convenientes para la ubicación de este tipo de sitios. El mapa de pendientes se obtuvo mediante la herramienta Slope, a través de modelo digital de elevación entregado por ALOS PALSAR con una resolución de

12,5 m y con fecha de adquisición 15/02/2011, este fue el modelo digital con mayor resolución encontrado a la fecha. En la figura 8 se puede observar el mapa de pendientes expresado en porcentaje.

- **Amenaza por deslizamiento:** Bajo este fenómeno se categoriza el proceso por el cual hay una posibilidad de desplazamiento de roca o suelo. Para un relleno sanitario esta variable juega un papel muy importante ya que en el diseño y operación del relleno son constantes las operaciones de excavación y movimiento de tierras, una mayor susceptibilidad a deslizamientos conllevaría una probabilidad mayor de derrumbes en el área de operación del relleno, En el Geoportal del IDIGER, se obtiene las capas de amenaza por remoción tanto para el área urbana como rural de Bogotá. En la figura 9 se observa el mapa de deslizamiento

- **Litología del suelo:** La porosidad y permeabilidad dependen estrechamente de la litología, del modo de sedimentación y de la historia geológica. Dependiendo de la textura del material del suelo, este se puede clasificar según (Fernandez, s.f) como:

Suelos Arenosos, son suelos “suelos”. Se caracterizan por tener una elevada permeabilidad al agua y por tanto una escasa retención al agua y a los nutrientes. Suelos Arcillosos, se denominan suelos “pesados” o fuertes. Presentan baja permeabilidad al agua y elevada retención al agua y de nutrientes. Suelos Limosos: se consideran “variación” especial más afín con los suelos arenosos Suelos de Francos: se considera la textura “ideal”, porque presenta una mezcla equilibrada de arena, limo y arcilla. Esto supone un equilibrio entre permeabilidad al agua, retención de agua y nutrientes.

De acuerdo a esta clasificación la permeabilidad está directamente relacionada a la textura del suelo, en la siguiente tabla se resume esta relación que fue revisada contra la Guía de índices de permeabilidad 2006 de la British Geological survey en la tabla 3.1 en la que se puede observar una relación más detallada.

Tabla 6. Permeabilidad para diferentes texturas de suelo en cm/hora

Textura	Permeabilidad Media	Permeabilidad Relativa
Arenosos	5.0	muy rápida
Franco arenosos	2.5	Rápida
Franco	1.3	Moderada
Franco arcillosos	0.8	Moderadamente lenta
Arcilloso limosos	0.25	Lenta
Arcilloso	0.05	muy lenta

Modificado de

http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm

La capa de suelos se puede conseguir en formato shp en los datos abiertos de agrología del IGAC clasificada por unidad cartográfica UCS, de acuerdo a esta unidad y con ayuda del Proyecto Compilación y Levantamiento de la información Geomecánica desarrollado para la sabana de Bogotá se obtuvo las texturas para cada una de las conformaciones, asociaciones según unidad cartográfica, y dependiendo del aporte de cada material según su descripción, tanto la capa que se obtuvo del IGAC como la del estudio tenían los mismos perfiles para cada tipo de suelo, por lo que se pudo llevar a cabo la comparación. En la tabla 7 se resume la caracterización realizada de permeabilidad para cada unidad cartográfica y en la figura 10 se observa el mapa de Litología de suelo.

Tabla 7. Caracterización Permeabilidad Relativa según unidad cartográfica

UCS	Textura	Fertilidad	Permeabilidad	UCS	Textura	Fertilidad	Permeabilidad
CA	restringido	restringido	N/A	MMCe2	Franco Arcillosa	Fertilidad baja	Moderadamente Lenta
MEAd	Limo Arcillosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad lenta	MEFe	Franco Arenosa	Fertilidad baja	Permeabilidad rápida
MEUf	Franco Arenosa	fertilidad baja	Permeabilidad rápida	MMCd	Franco Arcillosa	Fertilidad baja	Moderadamente Lenta
MEUe	Franco Arenosa	fertilidad baja	Permeabilidad rápida	MMCe	Franco Arcillosa	Fertilidad baja	Moderadamente Lenta
RLOa	Franco Arcillosa	Fertilidad moderada	Moderadamente Lenta	MMScg	franco arcillo limosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad lenta
RMOa	Arcillosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad muy lenta	MLCd	franco arcillo arenosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad rápida
MMKd	Franco arcillosa	Fertilidad alta	Moderadamente Lenta	MLCe	franco arcillo arenosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad rápida
MLJb	Franco	Fertilidad moderada	Moderada	MLVe	Limosa arcillosa carbonatada	Fertilidad alta	Moderada
MRKd	Franco arcillo limosa con abundante gravilla	Fertilidad moderada	Permeabilidad Muy Rápida	MLVf	Limosa arcillosa carbonatada	Fertilidad alta	Moderada
				MLSg	Limo Arcillosa	Fertilidad alta	Permeabilidad lenta
MGtd	Franco Arenosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad rápida	MGScg	Franco arenosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad rápida
MGtc	Franco Arenosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad rápida	MGff	Franco Arcillosa	Fertilidad moderada	Moderadamente Lenta
MLTd	Limo Arcillosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad lenta	MGFe	Franco Arcillosa	Fertilidad moderada	Moderadamente Lenta
MLKd	Franco Arenosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad rápida	MKcf	Limo Arcillosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad lenta
MLKc	Franco Arenosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad rápida	MKCe	Limo Arcillosa	Fertilidad moderada	Permeabilidad lenta
RMQa	Franco Arcillosa	Fertilidad alta	Moderadamente Lenta	MMVf	Limosa arcillosa carbonatada	Fertilidad moderada	Moderada
RMQb	Franco Arcillosa	Fertilidad alta	Moderadamente Lenta	MMVe	Limosa arcillosa carbonatada	Fertilidad moderada	Moderada
ME	erosionado	erosionado	Permeabilidad lenta	MMVe2	Limosa arcillosa carbonatada	Fertilidad moderada	Moderada
MEFg	Franco Arenosa	Fertilidad baja	Permeabilidad rápida	ZU	restringido	restringido	N/A

Fuente: Este Estudio

Las unidades resaltadas en amarillo son en la que está actualmente distribuido el relleno sanitario Doña Juana. Entre más permeable sea el sitio para el relleno sanitario mayor es la posibilidad de contaminación de aguas subterráneas y del subsuelo, esto se puede mitigar mediante el uso de capas poliméricas para evitar la infiltración de lixiviados.

Criterios económicos

- **Accesibilidad Vial:** Esta variable determina la facilidad con que los desechos pueden ser transportados desde las zonas de recolección hasta el relleno sanitario, pero indirectamente también representa la cercanía a asentamientos humanos y a la red de transporte. El sitio del relleno sanitario no debe estar tan lejos del acceso vial de forma que se aumenten los costos por operación de los camiones de basura, ni tan cerca para que afecte el desplazamiento o la salud de los vecinos que pasan por el relleno. La capa de información hace parte de la GDB del mapa de referencia del IGAC en su feature Class MVI del feature dataset Transporte Terrestre, en la figura 11 se observa el mapa de vías.

Criterios Sociales

- **Distancia perímetro Urbano y centros poblados:** Este tipo de sitios no son muy aceptados por la sociedad es evidente que a nadie le gusta estar en contacto y mucho menos estar cerca de este tipo de lugares, son numerosos los movimientos a nivel mundial como el NIMBY y las numerosas demandas que tiene el relleno sanitario Doña Juana por

esto entre más lejos este del perímetro urbano, mejor la disponibilidad del sitio, sin embargo no tan lejos de tal forma que llegar a los lugares de recolección se vuelva operativamente costoso. En la figura 12 se puede visualizar las zonas pobladas dentro de la zona de estudio AOI.

- Velocidad del viento:** Esta variable está ligada directamente con el transporte de olores a las zonas aledañas al relleno, pero también con la posibilidad de arrastrar partículas contaminantes que afecten la salud humana, una mayor velocidad aumenta el impacto. Al igual que la capa de precipitación la información en el visor de la secretaria de ambiente corresponde al área urbana de Bogotá, por ello se obtuvieron los datos hidrometeorológicos del IDEAM para el periodo 2017 para cada una de las estaciones en las que la variable VV_10_MEDIA_A que corresponde a la Velocidad del viento media anual se encontraba para el área de Cundinamarca, los datos fueron consolidados y mediante la herramienta IDW se obtuvo el mapa de predicción de velocidad del viento mostrado en la figura 7, en el que también se puede observar el mapa que se obtuvo de la secretaria de ambiente para el área urbana con información de 2017, un mapa de la CAR con información de la variable del 2014 y otro con información del 2005 proveniente de servicio WMS de la UPME, en los que se observan valores de velocidad del viento muy similares en el área de interés AOI.

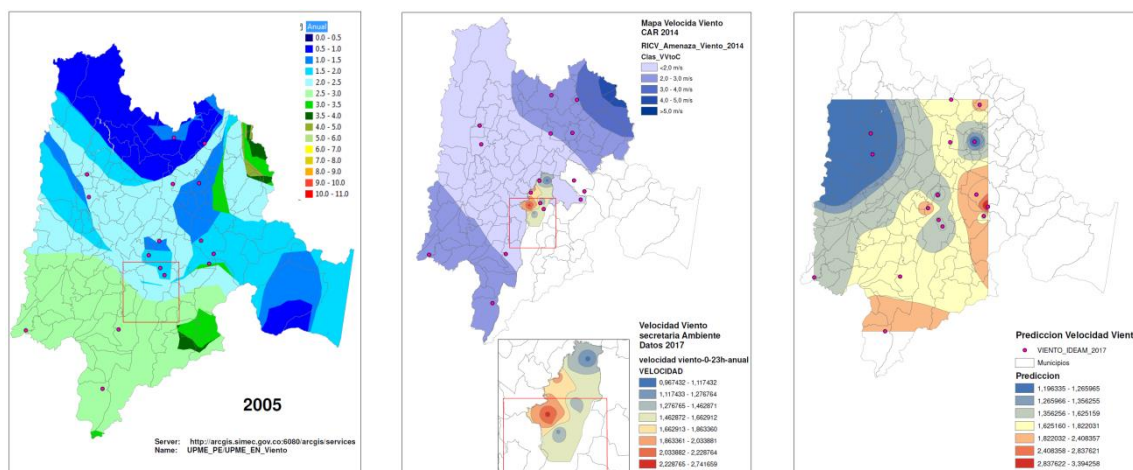


Figura 6. Predicción de la velocidad del viento. a) Mapa de precipitación UPME b) (arriba) Mapa Velocidad Viento CAR (abajo) Mapa Velocidad Zona Urbana Secretaria distrital ambiente, c) Mapa de predicción de la velocidad del viento IDEAM

3. Estandarización de Los Factores

En esta etapa se determinan los puntajes de cada factor y se normaliza cada una de las capas de entrada de tal forma que se representen en una escala común. En esta etapa en la metodología MCDA se hace uso de diferentes métodos tal como la comparación de pares a través de herramientas como el análisis jerárquico AHP en el que se construye una matriz con cada una de las variables y se califica la interacción que hay entre cada una de ellas. Otros medos como el de promedio ponderado OWA también es usado en esta etapa del proceso, sin embargo dado el alcance de este estudio y aprovechando la valoración dada en la tabla 4 de los diferentes estudios realizados, se dispondrá un puntaje de 0 para la condición menos idónea, 5 para una calificación intermedia y 10 para una condición óptima para la selección del sitio para la ubicación del relleno sanitario, acorde a cada uno de los criterios analizados, en dicha tabla, para la estandarización de las variables analizadas se hará uso de la herramienta reclasificación de Arcgis, una vez es rasterizada cada una de las capas de interés. En la tabla 8 se resume las variables utilizadas y los puntajes dados.

Tabla 8. Variables y estandarización de puntajes para el análisis MCDA-SIG

Variable	Valor	Pje	Variable	Valor	Pje	Variable	Valor	Pje	Variable	Valor	Pje
Distancia a cuerpos de agua m	> 2000	10	Litología del suelo Permeabilidad relativa	Permeabilidad lenta	10	Áreas Pobladas Distancia centros Urbanos Km	0 - 5	0	Accesibilidad Vial Distancia Vía de acceso m	0 - 500	1
	1000 - 2000	7		Moderadamente Lenta	8					500 - 1500	3
	500 - 1000	5		Permeabilidad muy lenta	6		5 - 10	10		1500 - 3000	7
	300 - 500	1		Moderada	4		10 - 25	5		3000 - 5000	10
	< 300	0		Permeabilidad Rápida	2		25 - 50	1		5000 - 10000	5
Precipitación mm	0 - 950	10		Permeabilidad Muy Rápida	1					10000 - 15000	3
	950 - 1500	5		Restringido	0		> 50	0		> 15000	0
	1500 - 2000	1	Pendientes %	0 - 3	10	Velocidad del viento m/s	<= 1	10			
	> 2000	0		3 - 7	9		1 - 1,5	8			
Amenaza por deslizamiento	BAJA	10		7 - 12	5		1,5 - 2,0	6			
	MEDIA	5		12 - 25	1		2 - 2,5	4			
	ALTA	1		> 25	0		> 2,5	1			

Fuente: Elaboración propia

El puntaje dado a distancia a cuerpos de agua, áreas pobladas, pendientes corresponde a los valores encontrados en el decreto 1077 de 2015 y ajustado el puntaje de 0 a 10, el valor de precipitación es basado en la información de la tabla 4 y ajustado a los valores encontrados, así mismo con la variable de accesibilidad vial y de Velocidad del viento, las variables amenaza por deslizamiento y permeabilidad relativa se puntuaron de acuerdo a la categorización encontrada en cada una de las variables.

4. Combinación lineal ponderada (WLC)

La unificación de los diferentes criterios se logra mediante la combinación lineal ponderada, bajo este método a cada una de las variables se les asigna una importancia relativa por el cual se compensa el modelo, la siguiente formula representa este modelo y la aplicación de la herramienta weighted overlay del Toolbox de Arcgis, herramienta para el análisis de superposición criterios, en la que como entrada se da cada una de las variables rasterizadas y clasificadas y se le asigna una ponderación relativa a cada una, como resultado se obtiene una capa con la combinación de los criterios coa áreas clasificadas de acuerdo a la escala de puntaje usado, en el caso de 1 a 10. En las figuras 7 a la 13 se presentan cada uno de los mapas clasificados y en la figura 14 el resultado de la combinación

$$S = \left(\sum_{k=1}^n x_i * W_i \right) - re$$

X_i : Valor en pixeles de la posición de cada criterio
 W_i : ponderación relativa de cada criterio
 re : Variables restrictivas
 K : Variable evaluada

La ponderación relativa de los criterios analizados fue considerada de acuerdo a lo encontrado en los diferentes estudios y su importancia sobre el 100%, cuerpos de agua 25% pendientes 9%, precipitación 10%, deslizamientos 15%, permeabilidad suelos 10%, Vías 10%, Centros poblados 12%, velocidad del viento 9%

Conclusiones

El éxito de la metodología MCDA-SIG depende en gran medida de la información geográfica disponible, aunque en el país existen varios sistemas y visores de información geográfica propios de cada dependencia tanto distrital como nacional, la información es variada y mayormente información WMS que no permite trabajar con las capas directamente o la información actualizada es restringida, aunque la información recopilada por el IDECA es

muy funcional, esta no contiene todos los elementos necesarios para la evaluación de la selección de la ubicación del relleno sanitario y se consume una gran cantidad de tiempo explorando y buscando la información en otras fuentes.

De la evaluación realizada bajo metodología MCDA-SIG se encontró que la actual área del relleno sanitario tiene una calificación de 5/10 y revisando cada uno de los criterios por separado se observa que la actual ubicación para el relleno no es la mas adecuada, sin embargo de observar el área de interés AOI se visualiza que alrededor del relleno en la ciudad no hay una área óptima para la ubicación del Relleno que sea lo suficientemente grande y que cumpla con los criterios seleccionados

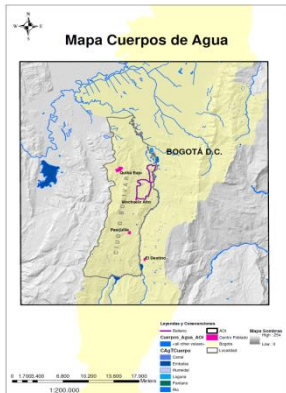


Figura 7. Mapa Cuerpos agua y Clasificación

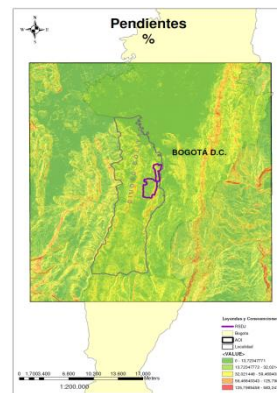
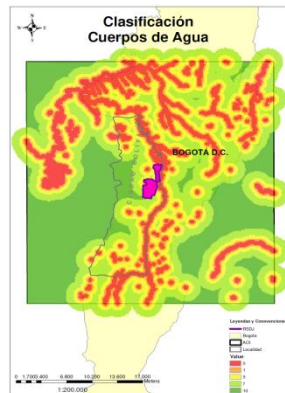


Figura 8. Mapa Pendientes y Clasificación

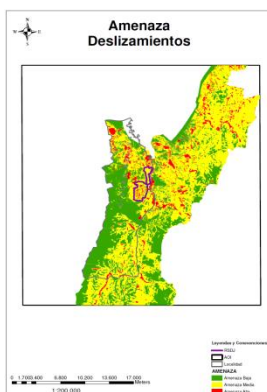
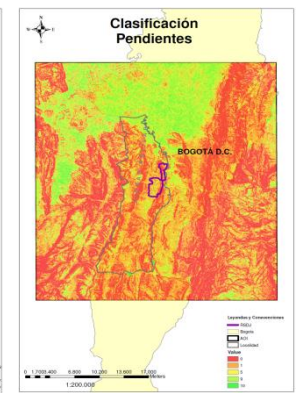


Figura 9. Mapa Deslizamientos y Clasificación

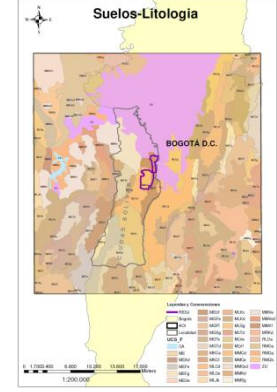
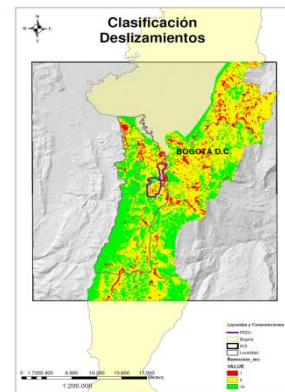


Figura 10. Mapa Suelos y Clasificación por permeabilidad

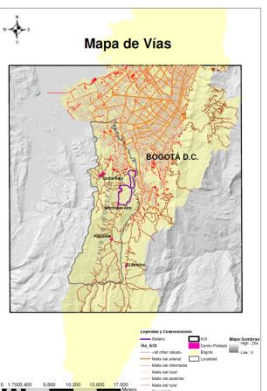
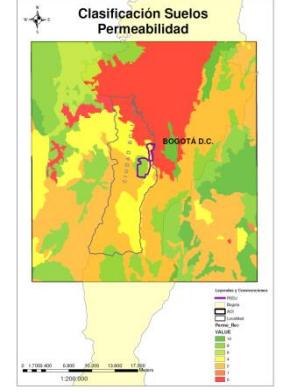


Figura 8. Mapa Suelos y Clasificación por permeabilidad

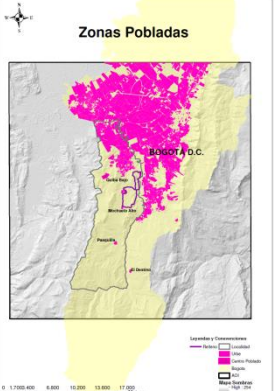
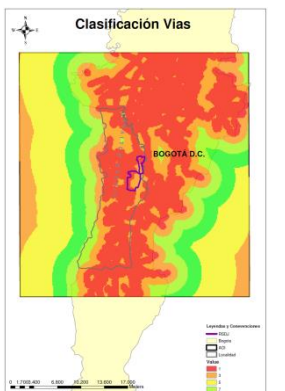
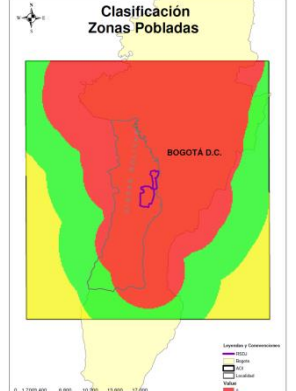


Figura 7. Mapa Centros poblados áreas urbanas y Clasificación



Bibliografía

- ABUJAYYAB, S. K. M., AHAMAD, M. S. S., YAHYA, A. S., BASHIR, M. J. Y AZIZ, H. A. (2016). GIS modelling for new landfill sites: critical review of employed criteria and methods of selection criteria. IOP Conference Series 37, 1-17. doi:10.1088/1755-1315/37/1/012053
- ALANBARI M., AL-ANSARI N., JASIM H., (2014). GIS and Multicriteria Decision Analysis for Landfill Site Selection in Al-Hashimiyah Qadaa. Natural Science, 6, 282-304.
- ALCALDIA LOCAL CIUDAD BOLIVAR, Plan ambiental local-Localidad 19 Ciudad Bolívar 2017-2020. Alcaldía Mayor de Bogotá, Secretaría de ambiente
- ALLEN, G., CAETANO, P., COSTA, C., CUMMINS, V., DONNELLY, J., KOUKOULAS, S., O'DONNELL, V., ROBALO, C., VENDAS, D. (2003). A Landfill Site Selection Process Incorporating Gis Modelling. Ninth International Waste Management and Landfill Symposium.
- ASHA C., VINOD, P. G. (2016). Solid waste disposal site selection by data analysis using GIS and Remote sensing tools: A case study in Thiruvananthapuram corporation area, International Journal of Geomatics and geosciences, 6(4), 1734-1747.
- COBOS, S., SOLANO J., VERA A., MONGE J. (2017). Análisis multicriterio basado en GIS para identificar potenciales áreas de emplazamiento de un relleno sanitario mancomunado en la provincia del Azuay. CONFibSIG 51-62.
- COLLAZOS H., (1998) Deslizamiento de basura en el relleno sanitario Doña Juana. Cepis Publicaciones.
- ELHAG, M., BAHRAWI, J. (2013). Spatial Assessment of Landfill Sites Based on Remote Sensing and GIS Techniques in Thermi, Greece. Department of Hydrology and Water Resources Management, Faculty of Meteorology, Environment & Arid Land Agriculture, King Abdulaziz University. 1-16
- HERRERA, N (2014). Identificación de áreas potenciales para el manejo de residuos o desechos peligrosos en el departamento de Cundinamarca. (Trabajo de grado). Universidad Nacional de Colombia facultad de Ingeniería, Bogotá.
- MALCZEWSKI, J., RINNER, C., (2015). Multicriteria Decision Analysis in Geographic Information Science, Advances in Geographic Information Science, Springer Science+Business, 23-54 DOI 10.1007/978-3-540-74757-4_2
- MĂNOIU, V., FONTANINE, I., COSTACHE, R., PRĂVĂLIE, R., MITOF, I. Using gis techniques for assessing waste landfill placement suitability. Case study: Prahova County, Romania, Geographia Technica, 8(2), 47-56.
- MOKHTAR M., WAN W., REV. M., WAN A. (2008). How gis can be a useful tool to deal with landfill site selection. International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences.
- MORENO, J., (s.f.), El flujo de basuras en el relleno sanitario de Doña Juana, ocurrido el 27 de septiembre de 1997, Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1-13.
- OBSERVATORIO DE SALUD AMBIENTAL (2015). RELLENO SANITARIO DOÑA JUANA. Alcaldía Mayor de Bogotá, secretaria de Salud
- RAHMAT, Z. G., NIRI, M. V., ALAVI, N., GOUDARZI, G., BABAEI, A. A., BABOLI, Z. Y HOSSEINZADEH, M. (2016). Landfill site selection using GIS and AHP: a case study: Behbahan, Iran. KSCE Journal of Civil Engineering. DOI: 10.1007/s12205-016-0296-9.
- TCHOBANOGLOUS, G., KREITH, F.(2002). Handbook of solid waste management. 2a ed McGRAW-HILL.
- ZAFRA, C., MENDOZA, F., MONTOYA, P. (2012). Metodología para la localización de rellenos sanitarios mediante sistemas de información geográfica. Un caso regional colombiano. INGENIERÍA E INVESTIGACIÓN, 32(1), 64-70.